

水处理絮凝工艺的优化设计和运行

武道吉 1, 吴濂河 2, 修春海 3, 李圭白 1

(1.哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江哈尔滨 150090; 2.温州市市政公用局, 浙江温州 325001;
3.济南市自来水公司, 山东济南 250012)

摘要: 在综合前人的基础理论和研究成果的基础上(包括生产性试验及运行数据), 对比和分析了各种絮凝控制指标, 提出最佳絮凝控制指标为 G 和 Eu, 在此基础上阐述了絮凝工艺的设计、运行要点和主要参数的选用。

关键词: 絮凝工艺; 设计; 运行; 优化

絮凝是给水处理的重要工艺环节之一, 滤池的出水水质主要由絮凝效果决定。实现高效絮凝首先必须: ①研究开发新型高效絮凝剂; ②研制适合新型高效絮凝剂作用特征的高效率絮凝反应器。目前高效絮凝剂已由聚合氯化铝发展到聚合氯化铁、铝硅复合絮凝剂、铁硅复合絮凝剂、铁铝共聚型絮凝剂、高铁氧化型絮凝剂、有机和无机复合絮凝剂以及天然絮凝剂等; 在高效絮凝研究方面国内出现了网格反应器, 国外则推出了折板式与波形板式反应设备, 使絮凝效果有了明显改善。国内外对絮凝理论的研究已为絮凝装置的设计提供了良好基础, 但目前对絮凝过程的理论研究多侧重于微观分析, 设计中以水流速度、停留时间等作为设计指标不能充分、全面地反映絮凝过程, 因此有必要按絮凝理论来探讨絮凝池设计的合理方法和指标。

1 絮凝控制指标

多年来国内外不少学者对絮凝池有关参数以及综合控制指标问题进行了探讨^[1], 通常以G与GT值作为絮凝效果的控制指标, 认为平均速度梯度G值综合地表征了水流紊动程度, 亦即反映了颗粒的碰撞频率, GT值则相当于单位体积的水体中颗粒碰撞的总次数。只要相应地保持G和GT值与絮凝池大致相同, 则搅拌试验在一定程度上能起到模拟生产过程的作用。有些研究者提出选用E1/3 代替G值, E1/3T作为判别絮凝效果的准数。近年国内有人曾建议以GTRe-1/2 作为衡量絮凝效果的一个综合指标, 以此作为推广小试结果的依据。

作者通过对絮凝动力学机理的研究分析提出 [2], 在紊流条件下水流沿垂流向可分为 3 层: 粘性底层、过渡区和紊流区。粘性底层是紧贴固体壁面的极薄层, 近似层流状态, 流速呈线性分布。在紊流区内紊流惯性力是主要特征因素, 粘性切应力很小, 只能产生尺度大而强度低的涡流。在这两层之间存在一速度梯度相当大、涡旋能量最大的区, 这一区域就是过渡区。该区中的流体受粘性切应力和紊流惯性力的影响接近于相同的数量级, 可认为满足局部平衡条件。由于粘性底层是极薄的流层, 且仅占据了絮凝池的极小一部分容积, 对絮凝颗粒成长作用甚微, 可忽略不计。紊流区是主流区, 占据絮凝池的绝大部分容积, 区域内剪切力小, 有利于絮凝体的成长, 且由于涡旋强度低、涡旋速度梯度小、颗粒接触碰撞速率小, 故对絮凝速率起主导作用。过渡区虽然也是很薄的流层, 占据很小一部分容积, 但该层内涡旋强度高、剪切力大, 对絮凝体有很强的破碎作用, 同时由于紊流扩散作用, 使过渡区和紊流区之间的絮凝颗粒连续循环交换, 因此该区主要对絮凝体的成长尺度及其密度起主导作用。

对于絮凝过程的有效能耗可以从两种角度来认识。形成絮凝体的能耗是指对颗粒碰撞、结合起作用的那部分能量, 从紊流理论的角度而言, 是指紊流区涡旋在衰减过程中的粘性耗散, 其量级估计为:

$$\varepsilon = \mu G_0^2 \sim E/R_e \quad (1)$$

式中 ε ——有效能耗率, W/m^3
E ——平均能量耗散率, W/m^3
 μ ——水的动力粘性系数, $Pa \cdot s$



G_0 ——涡旋速度梯度,s-1

Re ——特征雷诺数

日本的船水尚行等人对实际应用较广的竖流隔板絮凝池的水力特性和能耗特性进行了专门研究，他们用热线流速仪测定了絮凝池内的流速分布和紊流能谱。试验及分析结果表明^[3]，絮凝池总能耗 E 、有效能耗 ϵ 和特性雷诺数 Re 之间的关系： $\epsilon/E \sim Re^{-0.88}$ 与式(1)近似，另外国内有人通过对相似搅拌絮凝池中的能耗测定和分析也得出了与式(1)一致的结论^[3]。

絮凝过程中主流区涡旋速度梯度 G_0 可反映絮凝颗粒接触碰撞速率，则 [2]：

$$N \sim G_0 T = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} T \sim \sqrt{\frac{E}{\mu Re}} T = \sqrt{\frac{ET^2}{\rho V d}} = \sqrt{\frac{\Delta p L}{\rho V^2 d}} \sim \frac{\Delta p}{\rho V^2} = Eu \quad (2)$$

式中 N —— T 时间内单位体积水中颗粒碰撞的总次数

L ——水流长度

Δp ——水头损失

Eu ——欧拉准数

过渡区近似局部平衡，涡旋强度高、剪切力大。各国的大量研究都得出了在相同的原水和凝聚条件下达到絮凝平衡时，絮体粒径主要取决于速度梯度 G 这一结论。阿格曼等人据此提出了絮体平衡粒径 d 与速度梯度 G 的关系：

$$d = C / G \quad (3)$$

式中 C ——与原水絮凝性质有关的系数

保宪仁利用沉降管和摄影的方法对絮体粒径、有效密度和沉速进行了测定，并建立了絮体的密度公式：

$$\rho_e = \rho_s - \rho = \alpha / d^{K\rho} \quad (4)$$

式中 ρ_e ——絮体的有效密度， g/cm^3

ρ_s ——絮体密度， g/cm^3

ρ ——水的密度， g/cm^3

α ——常数，随混凝剂品种和加药量而定， g/cm^3

$K\rho$ ——指数常数，随混凝剂品种和加药量而定

由以上分析可以看出，絮凝反应的完善程度取决于欧拉准数 Eu ；絮体的成长尺度及有效密度取决于 G 值，因此 G 和 Eu 可作为絮凝工艺设计和运行的控制指标。

2 数据分析

对部分文献资料提供的生产性试验及实际运行效果较好的絮凝池参数进行统计，结果见表1。

由于无统一的栅条、网格、扎口、折板、波纹板式絮凝池的有关雷诺数 Re 计算方法，因此表1中无 $GRe^{-1/2}$ 项，其中：

$$T = \sum T_i$$

$$G = \sum G_i T_i / T$$

$$Eu = H_g / V^2 = \sum (H_i g / V_i^2)$$



- 式中 H——絮凝池总水头损失
V——絮凝池内当量水流速度
Vi——某絮凝段的平均水流速度
Hi——某絮凝段的水头损失

从表 1 的数据分析可以得出：

- ① 达到最佳絮凝效果时相对偏差最小的指标是 Eu，其变化范围较窄，主要集中在 75~110 之间，平均在 90 左右。
- ② 在实际絮凝过程中水体的运动相似是絮凝相似的必要条件，水流通常处于完全紊流状态，粘滞力和重力与惯性力相比可忽略不计，则流动水体的纳维埃—斯托克斯方程可简化为 [7]：

$$u'_x \frac{\partial u'_x}{\partial x} + u'_y \frac{\partial u'_x}{\partial y} + u'_z \frac{\partial u'_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x}$$

将上式无因次化，可得：

$$(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z}) = -\frac{\alpha_p}{\alpha_\rho \alpha_u^2} \frac{\partial p}{\partial x}$$

若运动相似，则 $\alpha_p/\alpha_\rho \alpha_u^2=1$ ，即 Eu 值相同，因此以 Eu 作为絮凝控制指标是有理论根据的。

③ 若令 $E=\lambda\rho V^3/d$ ，则欧拉准数 Eu 也可表示为 $Eu=\lambda GT/Re$ 或 $Eu=(\lambda^2 E/\rho d^2)1/3T$ ，可以看出该指标实际包含了目前已提出的所有其他指标：GT、 $E1/3T$ 和 GT/Re ，应该说它更完善。

④ 现行各种书籍中提供的 GT 值(104~105)实际上是由 Camp 调查美国十几家水厂絮凝池后总结出来的，由于 GT 值范围过大，因而也就失去了实际控制的意义。从生产性试验或生产数据分析可以看出，虽然最佳 GT 值在此范围内，但该指标是相对偏差最大的一个，这是因为 GT 值实际上是在层流条件下导出的，不可能用于紊流条件下的实际生产絮凝池。

⑤ $E1/3T$ 中以 $E1/3$ 代替 G 虽然是通过紊流能谱分析得出的，实际上仅包含了能量耗散对絮凝效果的影响，不包含絮凝池材料粗糙度、构造和水流尺度对絮凝效果的影响，且 $E1/3T$ 是一个有量纲的值，不能成为相似准数。

⑥ GT/Re 与 Eu 相比虽然仅相差系数 λ ，但 Re 无统一的计算方法，而 Eu 更便于应用，且其代表的物理意义也更直接。因为根据相似理论，欧拉准数是完全紊流条件下唯一的相似准数，可作为小型絮凝试验结果推广放大的依据。

表 1 生产性试验及运行数据 [4~6]

来源	絮凝形式	规模 (m ³ /d)	V(m/s)	H(cm)	T(min)	G(s ⁻¹)	GT	E ^{1/3} T	Eu
中南市政院试验	竖流孔口分流板	13820	0.155	18.0	7.11	63.9	27260	682	73.4
	竖流单通道折板	16000	0.166	24.2	7.83	66.0	31014	767	86.1
	竖流多通道折板	25000	0.145	16.1	6.1	60.4	22119	564	74.8
	竖流栅条	10412	0.084	5.7	6.14	37.5	13822	410	79.4
	竖流网格	10412	0.087	5.6	6.08	35.7	13030	396	72.5

	竖流单通道波纹板	48	0.089	7.3	7.7	36.7	16972	510	91.4
北京市政院试验	波纹板	1560	0.146	27.4	4.08	72.7	17797	426	125.9
南昌市朝阳水厂	双层往复隔板	50000	0.256	49.0	21.5	61.4	79206	2008	73.3
南京上元门水厂	竖流折板	60000	0.205	33.0	10.7	49.8	31972	869	77.0
沙市东区水厂	竖流栅条	16500	0.116	12.3	12.4	48.4	36010	988	89.6
南通市狼山水厂	竖流网格	55000	0.100	8.0	8.0	46.5	22320	620	78.4
镇江金山水厂	竖流折板	25000	0.129	16.0	1.28	50.0	30840	837	94.2
长春市二水厂	竖流隔板	90000	0.177	42.0	30.0	48.6	87480	2397	131.3
武汉市某水厂	竖流栅条	40000	0.083	6.5	10.98	31.0	20422	650	92.5
江苏六合县水厂	竖流折板	2500	0.115	16.0	10.28	50.0	30840	837	118.6
南宁市河南水厂	竖流栅条		0.130	15.0	6.1	63.2	23130	580	87.1
湖北汉阳水厂	竖流折板	1.5	0.178	22.0	8.35	70.5	35320	855	68.2
福州市某水厂	波纹板	170000	0.133	28.0	5.8	88.4	30763	690	155.1
	竖流网格	25000	0.094	12.8	7.8	51.9	24289	651	142.0
洪湖县水厂	竖流网格		0.083	5.6	6.1	41.2	15079	436	79.7
	竖流栅条		0.083	5.7	6.1	36.2	13249	400	81.2
昆山市某水厂池型	网格或栅条		0.013	12.0	8-10				69.6
洪湖县水厂池型	网格或栅条		0.09	6.0	6-8				72.6
平均值							29663	789	91.9
平均绝对偏差							12045	311.1	18.8
相对偏差							0.406	0.394	0.204
注：规模是指单组絮凝池的日处理水量。									

3 絮凝工艺的优化设计与运行

最佳絮凝工艺应满足下列两个基本要求：①水中的微小颗粒在絮凝池内形成易于在沉淀池中去除的絮体；②以最低限度的历时、混凝剂用量以及能耗来完成絮凝，从而获得最大的经济效益。可通过以下技术措施来实现：

a. 合理控制G、Eu值，G决定絮体的成长尺度和密度，而Eu决定絮凝反应的完善程度，实践证明合适的G值为 $100\sim 20s^{-1}$ ，并应逐级递减，Eu值建议取90以上。

b. 由 $Eu=(\lambda^2 E/\rho d^2)^{1/3}$ 可知，在施能水平保持一定的条件下减小水流尺度可有效地减少絮凝时间，即絮凝池中投加填料可提高絮凝效率，实际上现行的波纹板、折板、网格、栅条式絮凝池就是例证，这为今后开发研制新型高效絮凝填料提供了理论指导。

c. 根据反应器原理，反应器的分格数愈多愈近于推流式，反应所需的时间也愈短。但对于实际絮凝池分格数不应太多，宜为3~4档，每档3~4格，以防止施工、管理复杂及过多地增加投资。

d. 对新絮凝工艺的设计或现有絮凝工艺的改造，其参数也可先通过混凝沉淀试验获得^[8]。通过分档测定最佳絮凝效果时的Gi、Eu值，然后根据Gi、Eu值对应相等的原则，设计或改造实际絮凝工艺。

e. 絮凝主要由水力和机械两种形式，水力絮凝的主要特点是运行维护费用低、管理方便，但不便调节；



机械絮凝的特点则刚好与之相反。工程上一种有效的絮凝方式是将水力絮凝和机械絮凝相结合，开始先设水力絮凝，而将机械絮凝设在最后一个或两个絮凝阶段，这种方式可充分利用两种絮凝形式的优势。

参考文献:

- [1] 王乃忠.絮凝效果控制指标的选择 [J].中国给水排水,1989,5(6):38-40.
- [2] 武道吉,谭凤训,王新文,等.絮凝动力机理与控制指标研究 [J].环境工程,2000,18(5):22-25.
- [3] 王晓昌,曹羽中.絮凝池综合指标 GT/Re 物理意义的研讨 [J].中国给水排水, 1989,5(4):4-9.
- [4] 陈培康,裘本昌.给水净化新技术 [M].北京:学术出版社,1990.
- [5] 高志强.控制絮凝能耗的水力混合絮凝池技术总结 [J].中国给水排水,1985,1(2):33-38.
- [6] 左启东.模拟试验的理论和方法 [M].北京:水利电力出版社,1984.

<http://www.chinacitywater.org>
中国城镇水网